CONTROL DE LAS FUENTES DE CORRIENTE DE LAS BOBINAS SUPERCONDUCTORAS DE LOS GIROTRONES DEL TJ-II

A.Ros, A.Fernández, A.Tolkachev, G.Catalán

30 PP, 16 FIGS, 13 TABLES, 9 REFERENCES

Resumen

El sistema de calentamiento ECRH del stellarator TJ-II consta de dos girotrones que suministran una potencia máxima de 300 kW a la frecuencia de 53.2 GHz. Otro girotrón de 28 GHz se va a utilizar en el sistema de calentamiento mediante modos de Bernstein. Para conseguir la frecuencia adecuada, los girotrones necesitan un campo magnético del orden de varios teslas. Éste se consigue con una bobina superconductora alimentada por una fuente de corriente. En este documento se describe el desarrollo del control de dichas fuentes y de los amperímetros de alta precisión que miden la corriente en las bobinas de los tres girotrones. Se describe tanto la interfaz de usuario como la programación del sistema de control y la comunicación entre los dispositivos.

CONTROL OF THE SUPERCONDUCTING MAGNETS' CURRENT POWER SUPPLIES OF THE TJ-II GYROTRONS

A.Ros, A.Fernández, A.Tolkachev, G.Catalán

Abstract

The TJ-II ECRH heating system consists of two gyrotrons, which can deliver a maximum power of 300 kW at a frequency of 53.2 GHz. Another 28 GHz gyrotron is going to be used in the Bernstein waves heating system. In order to get the requiered frequency, the gyrotrons need and homegeneous magnetic field of several teslas, which is generated by a superconducting coil field by a current source. This document describes the current source control as well as the high precision ammeters control. These ammeters measure the current in the superconducting coils. The user interface and the programming of the control system are described. The comunication beetwen devices is also explained.

KEYWORDS: CONTROL SYSTEMS, GYROTRONS, PLASMA HEATING.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1
2. COMUNICACIÓN ENTRE LOS DISPOSITIVOS 4
2.1. Puertos serie RS232 4
2.2. Construcción del cable 5
2.2.1. Características particulares de las fuentes de corriente 6
2.2.2. Características particulares de los amperímetros digitales 7
3. MANUAL DE USUARIO - OPERACIÓN 8
3.1. Control fuente de corriente girotrón 1 y girotrón 2 9
3.2. Control fuente de corriente girotrón 3 11
3.3. Alarmas 12
4. MANUAL DE PROGRAMADOR 14
4.1. Fuente de corriente girotrón 1 y girotrón 2 14
4.1.1. Comandos de control 14
4.1.2. Desarrollo de la aplicación 16
4.2. Fuente de corriente girotrón 3 17
4.2.1. Comandos de control 17
4.2.2. Desarrollo de la aplicación 18
4.3. Amperímetro de precisión digital 18
4.3.1. Comandos de control 19
4.3.2. Desarrollo de la aplicación 22
4.4. Fuentes de corrientes y amperímetros digitales 23
5. VISUALIZACIÓN REMOTA 25
6. CONCLUSIONES 26
7. AGRADECIMIENTOS 27
8. REFERENCIAS 28

1. INTRODUCCIÓN

Mediante el sistema de calentamiento ECRH (*Electron Cyclotron Resonance Heating*) [1] se inyectan ondas electromagnéticas a la frecuencia de resonancia de los electrones en la cámara de vacío del stellarator TJ-II [2] para generar y calentar los plasmas. La potencia de microondas se genera en dos girotrones [3] y, posteriormente, es transmitida por dos líneas de transmisión cuasi-ópticas hasta la cámara de vacío [4].

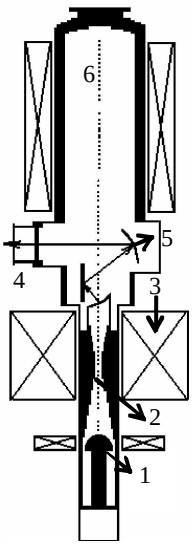
Los girotrones del sistema de ECRH (G1 y G2) tienen las siguientes características:

- Frecuencia de la radiación de salida: 53,2 GHz (correspondiente al segundo armónico de la frecuencia de giro de los electrones en el plasma)
- Máxima duración de pulso de 1 s.
- Potencia máxima de 300 kW
- Tipo triodo controlados por un modulador de ánodo
- Voltaje de operación: 70 kV y corriente de haz: 15 A
- Campo magnético en la bobina superconductora: ~ 2 T

Actualmente se está poniendo en marcha un sistema de calentamiento mediante modos de Bernstein [5]. El girotrón (G3) de este sistema tiene las siguientes características:

- Frecuencia de radiación de 28 GHz (correspondiente al primer armónico)
- Máxima duración de pulso de 100 ms.
- Potencia máxima de 300 kW
- Tipo diodo
- Voltaje de operación: 70 kV y corriente de haz: 18 A.
- Campo magnético en la bobina superconductora: ~ 1 T

En la figura 1 se observan las partes de un girotrón genérico y una fotografía de uno de los girotrones de 53,2 GHz del sistema de ECRH. Las microondas se generan en la cavidad resonante con la presencia de un campo magnético homogéneo, que establece la frecuencia de la radiación. Dicho campo está generado por una bobina superconductora que se encuentra en un criostato. Este criostato está formado por varias cavidades, una cavidad de helio líquido, otra de nitrógeno líquido y una cámara de vacío entre ambas. Esto se utiliza para minimizar la cantidad de helio líquido necesaria para mantener la temperatura umbral de superconductividad y minimizar así los costes. En la figura 2 podemos observar un corte transversal de la bobina junto con el criostato y una fotografía del criostato utilizado en el G3.



1.- Cañón de electrones
2.- Cavidad resonante
3.- Bobina superconductora
4.- Ventana
5.- Sistema de espejos
6.- Colector

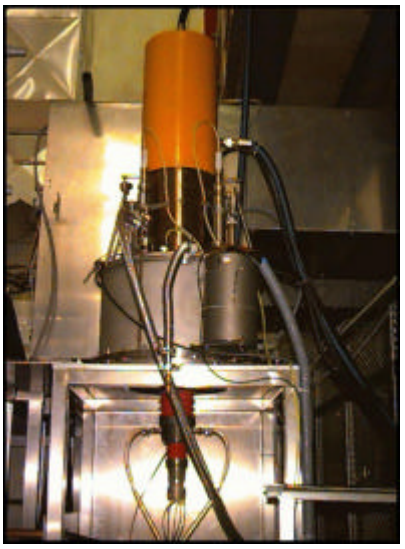
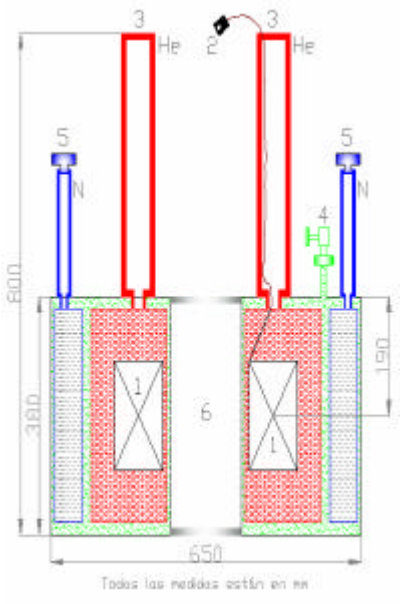


Figura 1. Izqda.: Estructura interna de un girotrón. Drcha.: Fotografía de uno de los girotrones actualmente en operación.



1.- Bobina
2.- Conexión bobina.
3.- Helio
4.- Vacío
5.- Nitrógeno
6.- Girotrón.

Figura 2. Izqda.: Estructura interna de un criostato. Drcha.: Fotografía de uno de los criostatos actualmente en operación.

Como se puede observar en la figura 3, cada girotrón cuenta con una fuente de corriente para inducir el campo magnético a través de la bobina superconductora. También cuenta con un amperímetro para medir la corriente exacta que circula por la bobina. Cada amperímetro está conectado a un *shunt* donde se mide la tensión en mV en bornes de una resistencia de 1m? . Cada mV medido corresponde a 1 A en la bobina. Estos amperímetros digitales de alta precisión son de cinco dígitos y medio, con posibilidad de controlarlos vía remota a través del puerto RS232. La marca es BK PRECISION y el modelo 5491/5492.

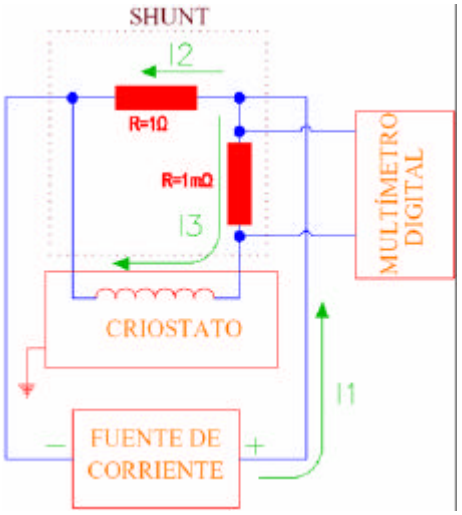


Figura 3: Esquema de la conexión entre los dispositivos

Las características más relevantes de las fuentes de corriente que controlan el campo magnético de los girotrones son:

- Fuente de corriente marca: OXFORD, modelo: PS120-3, versión del *firmware* interno: PS2.88.
- Máxima corriente de 120 A para un voltaje de ±3V.
- Todas las funciones de control pueden ser controladas vía RS232 en modo remoto.
- Posibilidad de operar tanto en modo local como en modo remoto.

La fuente de corriente del girotrón de 28GHz (G3) es otro modelo distinto de fuente, que tiene las siguientes características:

- Fuente de corriente marca: FuG, tipo: NTS 150M-3.
- Máxima corriente de 50 A para un voltaje de ±3V.
- Todas las funciones de control en modo local pueden ser controladas vía RS232 en modo remoto.
- Posibilidad de operar tanto en modo local como en modo remoto.

En este informe se explica tanto el control como el método de programación de todos estos dispositivos. El lenguaje de programación que se ha utilizado es el *Labview 7.0*.

El objetivo de implementar el control remoto en estas fuentes es situar todos los dispositivos de alta tensión y corriente dentro de la nave experimental para desacoplar galvánicamente mediante fibra óptica todas las señales entre la sala de control y la nave experimental. De esta manera la sala de control queda aislada de estos aparatos potencialmente peligrosos. Se pueden además adquirir lo parámetros referentes a las bobinas y se puede generar un registro de todos los parámetros de ECRH.

2. COMUNICACIÓN ENTRE LOS DISPOSITIVOS

2.1. Puertos serie RS232

La forma más común y sencilla de comunicar cualquier dispositivo con un ordenador es a través de su puerto serie, el cual es compatible con el estándar RS232 (o EIA232 Estándar). En un ordenador puede haber varios puertos series, normalmente denominados puertos de comunicaciones COM 1 y COM 2.

Los puertos serie son accesibles mediante conectores. La norma RS232 establece dos tipos de conectores llamados DB-25 (de 25 pines) y DB-9 (de 9 pines), machos y hembras. Dicha norma se estableció para conectar un ordenador con un módem, por lo que los conectores DB-25 tienen muchas patillas que en otro tipo de aplicaciones no se utilizan (como es en el caso del control de las fuentes de corrientes objeto de este trabajo) y en las que es más común utilizar el conector tipo DB-9.

Cada una de las patillas del conector RS232 tiene una función especificada por la norma. Hay unos terminales por los que se transmiten y reciben datos y otros que controlan el flujo y cierre de comunicación [6].

Se han empleado los puertos serie del ordenador para comunicar los distintos dispositivos (fuentes de corrientes y amperímetros digitales) con la CPU (*Central Processing Unit*). Una de las principales características de estos puertos, es que son asíncronos y la transmisión de datos es lenta.

Se ha elegido este tipo de puerto por su fácil manejo y bajo coste. Como se ha comentado antes la velocidad es lenta, pero éste no es un problema ya que las aplicaciones desarrolladas no necesitan una transferencia de datos muy grande.

Para cada dispositivo a controlar se utiliza un puerto de comunicación serie. Se tienen que controlar tres fuentes de corriente y tres amperímetros por lo que harán falta seis puertos de comunicación serie. Un ordenador viene provisto de uno o dos puertos serie según el modelo, en concreto el ordenador que gobernará todos los dispositivos tiene solo uno. Para un control de todos los elementos se adquiere e instala una tarjeta de expansión PCI (*Peripheral Component Interconnect*) con ocho puertos serie, como puede verse en la figura 4. Se debe instalar el *driver* correspondiente de la tarjeta en el ordenador. Una vez instalado con su correspondiente numeración de puertos, se procede a la identificación de cada uno de ellos en referencia a su control.

Figura 4: Tarjeta de expansión de 8 puertos RS232

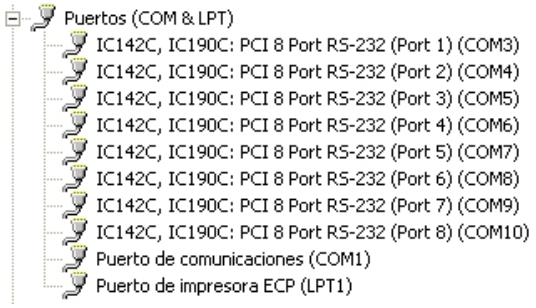

Puertos (COM & LPT)
IC142C, IC190C: PCI 8 Port RS-232 (Port 1) (COM3)
IC142C, IC190C: PCI 8 Port RS-232 (Port 2) (COM4)
IC142C, IC190C: PCI 8 Port RS-232 (Port 3) (COM5)
IC142C, IC190C: PCI 8 Port RS-232 (Port 4) (COM6)
IC142C, IC190C: PCI 8 Port RS-232 (Port 5) (COM7)
IC142C, IC190C: PCI 8 Port RS-232 (Port 6) (COM8)
IC142C, IC190C: PCI 8 Port RS-232 (Port 7) (COM9)
IC142C, IC190C: PCI 8 Port RS-232 (Port 8) (COM10)
Puerto de comunicaciones (COM1)
Puerto de impresora ECP (LPT1)

Figura 5: Esquema de asignación de puertos RS232

Únicamente se utilizan los puertos de la tarjeta del uno al seis, es decir, del COM3 al COM8 según se muestra en la figura 5. En la tabla 1 se identifica el dispositivo que se va a controlar con su puerto de comunicaciones.

Port	COM	Instrumento	Girotrón	Color
Port 1	Com 3	Fuente Oxford PS120-3	G1	Rojo
Port 2	Com 4	Amperímetro BK PRECISIÓN		
Port 3	Com 5	Fuente Oxford PS120-3	G2	Verde
Port 4	Com 6	Amperímetro BK PRECISIÓN		
Port 5	Com 7	Fuente FuG NTS 150M-3	G3	Azul
Port 6	Com 8	Amperímetro BK PRECISIÓN		

Tabla 1: Esquema de asignación de puertos RS232

Cabe destacar que el control de cada dispositivo va asignado a un puerto de comunicaciones serie y a su vez a cada uno de los girotrones se le ha asociado un color fundamental RGB (*Red, Green, Blue*), para poder identificar con un simple golpe de vista el sistema que se controla y facilitar la labor del operador.

Para que se realice una comunicación entre dos dispositivos, sin control de flujo, es suficiente con tres líneas:

- Línea de transmisión (TxD) *(Transmitted Data).*
- Línea de recepción (RxD) *(Received Data).*
- Pin de masa (SG) *(Signal Ground).*

2.2. Construcción del cable

En este apartado se describe el tipo de conexión disponible en los dispositivos que se van a controlar, así como su cableado y la asignación de pines. Entre el ordenador y cada dispositivo hay un conversor eléctrico-óptico y óptico-eléctrico. Los conversores

eléctrico-óptico están en la sala de control mientras que los conversores óptico-eléctrico estarán en la nave experimental. Las conexiones se efectúan entre el ordenador de control (desde su tarjeta de expansión RS232) hasta cada dispositivo. Los conversores son totalmente transparentes a las señales enviadas o recibidas. El ordenador que se encarga del control de todos estos dispositivos tiene las siguientes características:

- Procesador Pentium IV a 2,4 GHz con 512 Mb de memoria RAM (*Random Acces Memory*) DDR (*Doble Data Rate*).
- Plataforma de trabajo CENIT 2000 (*Computación en un ENtorno Integrado de Trabajo*) del CIEMAT.
- Programa de control desarrollado en *Labview 7.0* instalado desde CENIT.

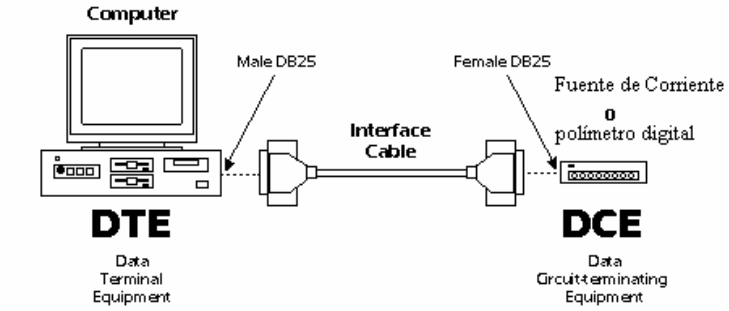


Figura 6: Conexión entre el ordenador y dispositivos a controlar

2.2.1. Características particulares de las fuentes de corriente

Las fuentes de corriente Oxford PS120-3 y FuG NTS 150M-3, vienen provistas de un conector hembra serie de 25 pines en su panel trasero. Las unidades están configuradas como DCE (*Data Comunication Equipment*) y están conectadas directamente a un ordenador configurado como DTE (*Data Termination Equipment*), como puede observarse en la figura 6. Si en algún caso el ordenador se configura como DCE o la unidad como DTE, hay que intercambiar los pines 2 y 3. Podemos observar en la figura 7 la conexión entre ambos dispositivos.

Las fuentes de Corriente en la comunicación RS232 no utilizan las líneas de control de flujo de datos *'modem control'*, solamente necesita los pines 2, 3 y 7 del conector DB25 según muestra la figura 7.

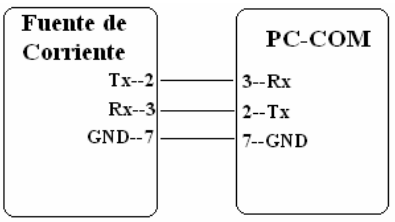


Figura 7: Esquema de conexión de pines entre el ordenador y las fuentes de corriente

En la fuente de corriente FuG NTS 150M-3 se ha instalado internamente una fuente de alimentación de 5 Vcc para alimentar el puerto de comunicaciones RS232. Esta fuente de tensión alimentará un conversor eléctrico-óptico (RS232-fibra óptica). El esquema del mismo se puede ver en la figura 8.

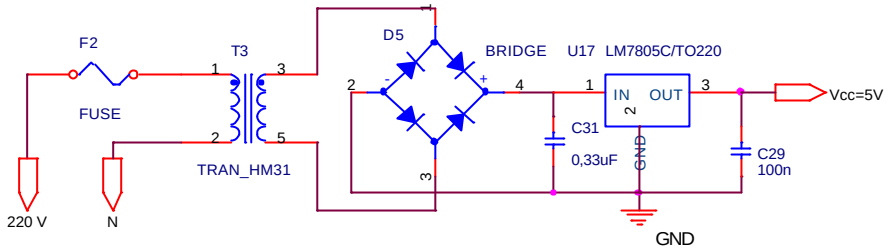


Figura 8: Esquema fuente de alimentación 5 Vcc

2.2.2. Características particulares de los amperímetros digitales

Los tres amperímetros digitales BK PRECISION 5491/5492 vienen provistos de un conector serie de 9 pines en su panel trasero. La unidad está configurada como DCE (*Data comumunication equipment*) y está conectada directamente a un ordenador configurado como DTE (*Data termination equipment*). Si en algún caso el ordenador se configura como DCE ó la unidad como DTE, hay que intercambiar los pines 2 y 3. Podemos observar en la figura 9 la conexión entre ambos dispositivos.

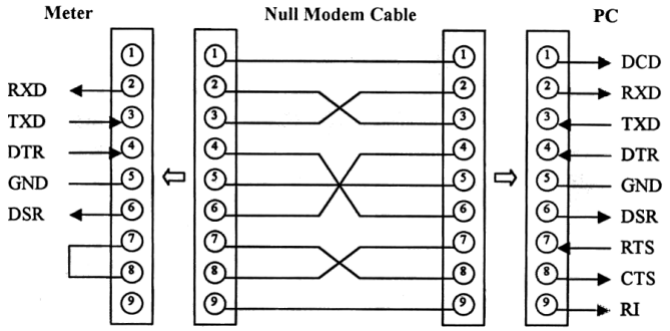


Figura 9: Esquema de interconexión de pines entre el PC y el amperímetro digital

Los amperímetros digitales en la comunicación RS232, no utilizan las líneas de control de flujo de datos '*modem control*', solamente necesitan los pines 2, 3 y 5 del conector DB9.

3. MANUAL DE USUARIO - OPERACIÓN

Para iniciar los programas de control, en primer lugar hay que poner en funcionamiento las fuentes de corrientes y los amperímetros digitales de precisión. En segundo lugar hay que encender el ordenador de control e iniciar la sesión en la cuenta CENIT. Se introduce en nombre de usuario y la contraseña y automáticamente se inician los programas de control del campo magnético de los girotrones (que previamente han sido instalados en el PC y generados sus ejecutables), obteniendo por pantalla una imagen similar a la figura 10.

Figura 10: Paneles de control de las fuentes de corriente y los amperímetros digitales.

Los programas del control del campo magnético de los girotrones 1 y 2 son idénticos, mientras que el tercero es diferente, esto es debido a que las fuentes de corriente son distintas. La comunicación entre dispositivos es serie, se utiliza el Standard RS232 y no se emplea el control de flujo de datos. Los programas tienen un pequeño retardo aproximadamente de 1 segundo, debido a la velocidad del puerto serie y al número de comandos enviados y recibidos. Uno de los pilotos de la pantalla indica el refresco del programa.

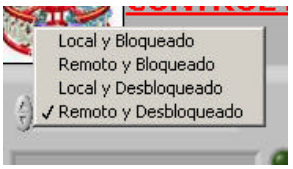
3.1. Control fuente de corriente girotrón 1 y girotrón 2

La primera pantalla que aparece en el monitor es la mostrada en la figura 11. Como se ha comentado antes, las fuentes de corriente del G1 y del G2 son idénticas, por lo que el control es el mismo, sólo cambia el número del puerto de comunicación, las letras y el color para distinguirla de la otra fuente.

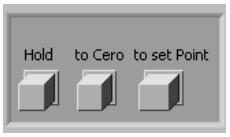
Figura 11: Panel de control fuente de corriente girotrón 1

Descripción de cada uno de los ítems:

1. Selección del modo de control. Hay cuatro modos:
    - **Local y Bloqueado.** Es la opción por defecto al arrancar, solo se puede operar desde el panel frontal y el modo remoto está bloqueado.



    - **Remoto y Bloqueado**. Se opera desde el control remoto y no se puede operar en el panel frontal.
    - **Local y Desbloqueado**. Se opera desde el panel frontal y se puede adquirir datos desde el modo remoto.
    - **Remoto y Desbloqueado**. Se opera desde el panel remoto aunque también se pueden variar parámetros desde el panel frontal.
2. Actividad.
    - ***Hold.*** Mantiene fijo el valor de la corriente.
    - ***To cero*.** Pone a cero el valor de la corriente.
    - ***To set point*.** Manda el valor de corriente fijado en el punto 7.

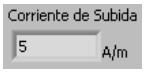


3. Indicador de actividad. El piloto encendido indica en qué actividad se encuentra la fuente.

4. Indicadores de estado.
    - ***Clamped***. Si se ilumina de color rojo indica que se ha producido un error y la fuente bloquea la corriente a su valor actual.

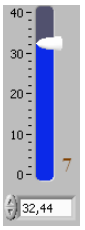
    - ***Quenched***. Si se ilumina de color rojo indica que la fuente ha detectado una bajada repentina de corriente. Es un evento muy poco frecuente. Si se produce, la fuente de corriente toma el control e irá rápidamente a cero.
    - **Estado Fuente**. Si se ilumina de color rojo la fuente detecta que hay un calentamiento en la bobina.

5. Corriente de subida. Devuelve el valor en amperios/minuto de la velocidad de subida de corriente.

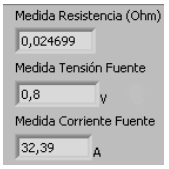


6. Testigos del modo de control. Los pilotos de color verde indican en que modo de control se encuentra según el punto 1. Refresco indica que está comunicándose con la fuente de corriente para actualizar los datos.

7. *Set point* corriente de entrada. Se introduce el valor de corriente deseada en amperios. Puede hacerse con la barra o introduciendo el valor en la ventana. Al pulsar los botones, aumenta o disminuye el valor en 1 milésima.

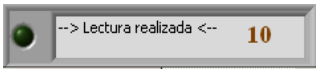


8. Medidas de la fuente de corriente. Señala el valor de la corriente y voltaje de salida de la fuente. Calcula a partir de estos dos valores la resistencia equivalente de la bobina.



9. Medida de la corriente en la bobina. Esta medida la realiza el amperímetro y es la corriente que circula por la bobina.

10. Diálogo control de comunicación. Muestra tanto los errores como el estado del amperímetro.



11. Salir.

12. Info.

3.2. Control fuente de corriente girotrón 3

La primera pantalla que aparece en el monitor es la mostrada en la figura 12.

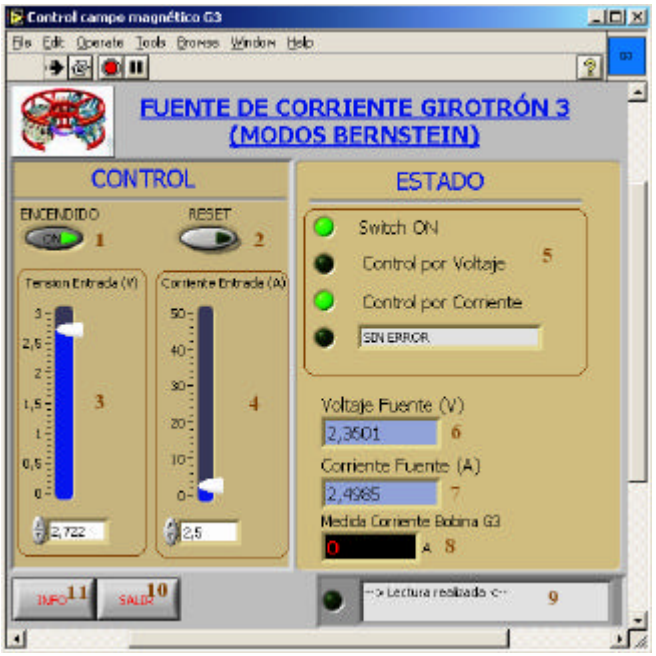


Figura 12: Panel de control fuente de corriente girotrón 3.

Descripción de cada uno de los ítems.

1. Encendido y apagado.
2. Reset. Resetea la fuente y pone los valores por defecto.
3. *Set point* voltaje. Se introduce el valor de tensión. Puede hacerse con la barra o introduciendo el valor en la ventana. Al pulsar los botones, aumenta o disminuye el valor en 1 milésima.
4. *Set point* corriente de entrada. Se introduce el valor de corriente deseada en amperios. Puede hacerse con la barra o introduciendo el valor numérico en la ventana. Al pulsar los botones, aumenta o disminuye el valor en 1 milésima.
5. Indicadores de estado.
   - ***Switch on.*** Indica si la fuente está encendida (verde) o apagada (rojo) con un testigo luminoso.
   - **Control por voltaje**. Indica que no hay suficiente

voltaje para la corriente puesta en el *setpoint*. Se debe variar el voltaje para poder llegar a la corriente deseada.

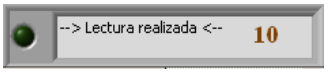
- **Control por corriente.** Indica que hay suficiente voltaje para obtener la corriente puesta en el *setpoint*.
- **Error**. Indica en el *display* el tipo de error.

6. Voltaje de salida. Muestra el valor de voltaje a la salida de la fuente.

7. Corriente salida. Muestra el valor de corriente a la salida de la fuente.

8. Medida de la corriente en la bobina. Esta corriente es la que circula por la bobina y la mide un amperímetro.

9. Diálogo control de comunicación. Muestra tanto los errores como el estado del amperímetro.



10. Salir.

11. Info.

3.3. Alarmas

Se han implementado varios tipos de alarma tanto sonoras como visuales. Cada alarma va asociada a un tipo de error. Siempre que se active una alarma, sonará una sirena junto con el tipo de error, saldrá una ventana guiada para que el operador pueda solucionar el error. Las alarmas que se han implementado son:

- **Error de comunicación fuente de corriente**. Indica que no hay comunicación entre el ordenador y la fuente de corriente del girotrón. Muestra la ventana que hay en la figura 13 para que el operador pueda solucionar el tipo de error.

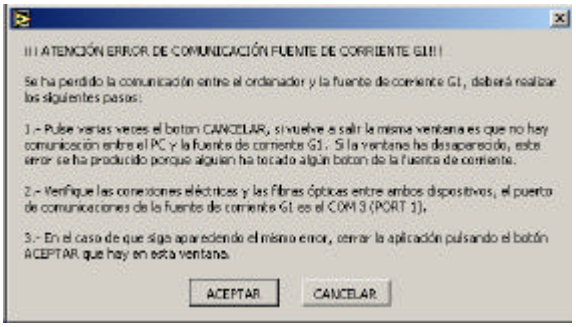

¡¡¡ ATENCIÓN ERROR DE COMUNICACIÓN FUENTE DE CORRIENTE G1!!!
Se ha perdido la comunicación entre el ordenador y la fuente de corriente G1, deberá realizar los siguientes pasos:
1.- Pulse varias veces el boton CANCELAR, si vuelve a salir la misma ventana es que no hay comunicación entre el PC y la fuente de corriente G1. Si la ventana ha desaparecido, este error se ha producido porque alguien ha tocado algún boton de la fuente de corriente.
2.- Verifique las conexiones eléctricas y las fibras ópticas entre ambos dispositivos, el puerto de comunicaciones de la fuente de corriente G1 es el COM3 (PORT 1).
3.- En el caso de que siga apareciendo el mismo error, cerrar la aplicación pulsando el botón ACEPTAR que hay en esta ventana.
ACEPTAR
CANCELAR

Figura 13: Mensaje de error de comunicación del girotrón 1.

En los otros dos controles del campo magnético, aparece la misma ventana pero con referencia a sus propios cables y conexiones, tal como están definidas en la tabla 3.

- **Error interno fuente de corriente G1 o G2**. Indica que ha ocurrido un error interno en la fuente de corriente. La bobina pierde la superconductividad y hay que rearmar la fuente, para ello se siguen los pasos que muestra la figura 14.

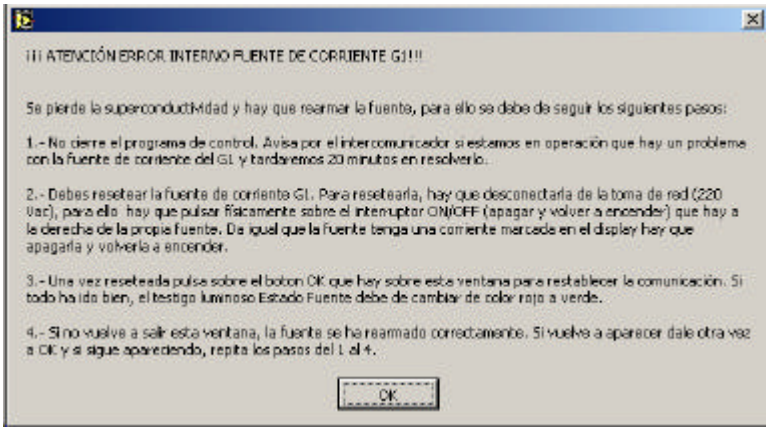

¡¡¡ ATENCIÓN ERROR INTERNO FUENTE DE CORRIENTE G1!!!
Se pierde la superconductividad y hay que rearmar la fuente, para ello se debe de seguir los siguientes pasos:
1.- No cierre el programa de control. Avisa por el intercomunicador si estamos en operación que hay un problema con la fuente de corriente del G1 y tardaremos 20 minutos en resolverlo.
2.- Debes resetear la fuente de corriente G1. Para resetearla, hay que desconectarla de la toma de red (220 Vac), para ello hay que pulsar físicamente sobre el interruptor ON/OFF (apagar y volver a encender) que hay a la derecha de la propia fuente. Da igual que la fuente tenga una corriente mercada en el display hay que apagarla y volverla a encender.
3.- Una vez reseteada pulse sobre el boton OK que hay sobre esta ventana para restablecer la comunicación. Si todo ha ido bien, el testigo luminoso Estado Fuente debe de cambiar de color rojo a verde.
4.- Si no vuelve a salir esta ventana, la fuente se ha rearmado correctamente. Si vuelve a aparecer dale otra vez a OK y si sigue apareciendo, repita los pasos del 1 al 4.
OK

Figura 14: Mensaje de error interno fuente de corriente girotrón 1.

- **Error interno fuente de corriente G3**. Indica que ha recibido datos erróneos como indica la figura 15.

¡¡¡ ATENCIÓN ERROR INTERNO FUENTE DE CORRIENTE G3!!!
La fuente ha recibido un comando no válido, si el error persiste, cierra el programa y ábralo de nuevo.
OK

Figura 15: Mensaje de error interno fuente de corriente girotrón 3.

4. MANUAL DE PROGRAMADOR

Se han creado diversas subrutinas de las cuales hay cuatro principales (fuente de corriente G1, fuente de corriente G2, fuente de corriente G3 y amperímetro digital), que se encargan del control de cada uno de los dispositivos.

4.1. Fuente de corriente girotrón 1 y girotrón 2

Hay que configurar tanto en la fuente como en el ordenador una serie de parámetros para que la comunicación se haga de la forma correcta. El puerto de comunicaciones serie RS232, según el manual de usuario [7], debe tener los siguientes parámetros: [9600,8,N,2,n] (9600 baudios, 8 bits, no paridad, 2 bits stop, no control de flujo).

4.1.1. Comandos de control

Se dividen en dos categorías:

1. **Comandos de monitor**. Siempre son reconocidos por la fuente en modo remoto y local. Los clasificamos en:
    - *Set Control* (Cn). Cambia el modo de controlar la fuente (local o remoto). El estado por defecto al encender la fuente es el C0 según la tabla 2.

Comando	Descripción
C0	Local y bloqueado
C1	Remoto y bloqueado
C2	Local y desbloqueado
C3	Remoto y desbloqueado.

Tabla 2: Comandos Set Control

    - Protocolo de comunicación (Qn). Define el protocolo de comunicación. El protocolo por defecto al encender la fuente es el Q0 según la tabla 3.

Comando	Descripción
Q0	Normal
Q2	Envía final de línea <LF> después de un retorno de carro <CR>.
Q16	Protocolo reducido (PS126)
Q18	Protocolo reducido y <LF> después de <CR>

Tabla 3: Comandos de control

- Lectura de parámetros (Rnn). Lee los parámetros de la fuente según el comando enviado como muestra en la tabla 4.

Comando	Descripción
R0	Medida de corriente
R1	Medida de voltaje
R2	Medida campo magnético
R5	Lectura Corriente SetPoint indicado (A)
R6	Lectura corriente de subida (A/Min)

Tabla 4: Comandos de control

- Lectura de la versión (V). Este comando no requiere ningún parámetro. Devuelve un mensaje indicando el tipo de instrumento y número de versión del software.
- Estado del sistema (X). Examina los comandos permitidos del ordenador para leer el estado de la fuente de corriente. No requiere ningún parámetro y devuelve una cadena de 15 caracteres de la siguiente forma: **X**mn**A**n**C**n**H**n**M**mn**P**mn. Los dígitos 'm' y 'n' tienen el siguiente significado:
    - Xmn (Estado del Sistema).
        - m=0 Normal.
        - m=1 *Quenched*.
        - m=2 Sobre calentamiento.
        - m=4 Calentando.
        - n=0 Normal.
        - n=1 Voltaje límite positivo.
        - n=2 Voltaje límite negativo.
        - n=4 Límite de corriente negativa.
        - n=8 Límite de corriente negativa.
    - An (Actividad).
        - n=0 *Hold.*
        - n=1 *To set point*.
        - n=2 *To cero*.
        - n=4 *Clamped*.

- Cn (Estado local o remoto).
  - n=0 Local y bloqueado.
  - n=1 Remoto y bloqueado.
  - n=2 Local y desbloqueado.
  - n=4 Remoto y desbloqueado.
  - n=5 Modo automático.

2. **Comandos de control**. Sólo son reconocidos en modo remoto. Los clasificamos en:
   - Control de actividad (An). Activa los comandos correspondientes a *hold*, *Set point* y *cero* del panel frontal. Los posibles valores de 'n' son (tabla 5):

Comando	Descripción
A0	*Hold*
A1	*To set point*
A2	*To cero*

Tabla 5: Comandos de control

   - Control de corriente (Innnnn). Este comando indica a la fuente el *setpoint* de corriente deseado. El parámetro 'nnnnn' es la corriente requerida.
   - Control de modo (Mn). Este comando muestra el tipo de dato que muestra por el display (campo magnético o corriente). Por defecto en el programa se envía el comando M6 (amperios).
   - Control corriente de subida (Snnnnn). Este comando controla la corriente de subida en amperios por minuto.

4.1.2. Desarrollo de la aplicación

Nada más iniciar el programa, este se introduce en un bucle *"Do while"*, el cual comprueba que haya comunicación, luego envía una secuencia de comandos a la fuente para que devuelva el estado en el que se encuentra y posteriormente detecta si se ha pulsado algún botón o se ha cambiado el valor de corriente de *set point*. El programa saldrá del bucle cuando la comunicación no sea correcta, exista algún error interno en la fuente de corriente o en el amperímetro, o se pulse el botón de salir del programa.

4.2. Fuente de corriente girotrón 3

Según el manual de usuario de la fuente de corriente FuG [8], la configuración del puerto serie es la siguiente: [9600,8,N,1,n] (9600 baudios, 8 bits, no paridad, 1 bit stop, no control de flujo).

4.2.1. Comandos de control

En las tablas siguientes se muestran todos los comandos que han sido usados para el control en *Labview* de la fuente de corriente FuG NTS 150M. Se ha dividido en dos tablas: comandos tabla de control y comandos tabla de estado (tabla 6 y tabla 7 respectivamente).

Comandos tabla de control.

En esta tabla se muestran todos los comandos de control. Una vez que la fuente recibe los comandos no devuelve ningún parámetro de confirmación al ordenador.

Comandos de control	Descripción
F0	Fuente de corriente off
F1	Fuente de corriente on
G0	Cada comando que recibe la fuete se ejecuta inmediatamente
G1	Los comandos se ejecutan después de recibir el comando 'X'
X	Comando que indica a la fuente la ejecución de todas los comandos anteriores, si anteriormente se ha mandado el comando G1
In	Corriente de *set point*, donde n es la corriente en el formato coma flotante.
Un	Voltaje de *Set point*, donde n es el voltaje en el formato de coma flotante.
=	Reset

Tabla 6: Comandos de control

Comandos tabla de estado

En esta tabla se muestran los comandos que se le envía a la fuente para saber en qué estado se encuentra y los valores que está devolviendo. Cada uno de estos comandos deberá ser enviado junto con el carácter '?' (*monitor trigger*) para obtener una respuesta de la fuente de corriente.

Comandos de estado	Descripción
N0	Voltaje actual
N1	Corriente actual
N2	Estado
N5	Número de versión
N6	Número de serie
In	Corriente de *set point*, donde n es la corriente en el formato coma flotante.
Un	Voltaje de *set point*, donde n es el voltaje en el formato de coma flotante.

Tabla 7: Comandos de estado

4.2.2. Desarrollo de la aplicación

El desarrollo de la aplicación de control de la fuente FuG, se ha realizado de la misma manera que el de las fuentes Oxford. Se ha utilizado la misma filosofía y estructura de programación salvo que los comandos son diferentes.

4.3. Amperímetro de precisión digital

Según el manual de usuario del ampeímetro digital [9], la configuración del puerto serie es la siguiente: [9600,8,N,1,n] (9600 baudios, 8 bits, no paridad, 1 bit stop, sin control de flujo).

El amperímetro identifica cada comando recibido del ordenador con un carácter terminador. Estos caracteres terminadores van acorde según la tabla 8. Todos los comandos que envía van seguidos de dos bytes de datos: <CR>+<>LF.

Comando respuesta	Descripción
*>	Inicializando estado del amperímetro
=>	El comando es ejecutado y no hay errores
!>	Error en un comando
¿>	Error en un parámetro
#>	Se ha presionado el botón del modo local
S>	La función se está configurando
@>	Lectura del display no disponible

Tabla 8: Comandos de respuesta amperímetro

Después de realizar una medida el amperímetro devuelve un comando de respuesta que tendrá el siguiente formato:

<RESULT>+<CR>+<LF>+<Comando Respuesta>+<CR>+<LF>

Donde CR es un Retorno de Carro y LF es Final de Línea.

4.3.1. Comandos de control

Los comandos de control los agrupamos en tres tipos: comandos llave, *set command* y comandos de respuesta.

- **Comandos llave**. Se han implementado 18 comandos para controlar el panel frontal del amperímetro, los cuales los encontramos en la tabla 9:

Comando	Equivalencia en el panel frontal
K1	Vdc
K2	Adc
K3	Vac
K4	Aac
K5	?
K6	Diodo
K7	Hz
K8	AUTO
K9	⇧
K10	⇩
K11	Min-Max
K12	Hold
K13	Relativo
K15	Shift
K16	2nd
K17	Vdc y Vac
K18	Adc y Aac
RST	Resetea y reinicializa el amperímetro
RV	Envía la versión del firware.

Tabla 9: Comandos llave

- ***Set Commands***. Con este comando se configura el rango, las funciones de medida y el rango de lectura del amperímetro. En la tabla 10 hay un resumen general de todos los comandos *set commands*.

Function	<f_1>=	<f_2>=	<r_1> or <r_2>=	Range		
				Sow Rate	Med. Rate	Fast Rate
Vdc	0		1 2 3 4 5	120mV 1.2V 12V 120V 1000V	400mV 4V 40V 400V 1000V	
Vac	1		1 2 3 4 5	120mV 1.2V 12V 120V 750V	400mV 4V 40V 400V 750V	
Ω/2-wire	2	N/A (1)	1 2 3 4 5 6 7	120Ω 1.2kΩ 12kΩ 120kΩ 1.2MΩ 12MΩ 120MΩ	400Ω 4kΩ 40kΩ 400kΩ 4MΩ 40MΩ 300MΩ	
Ω/4-wire	3					
Adc	4		1 2 3 4	12mA 120mA 1.2A (2) 12A	40mA 120mA 1.2A (2) 12A	
Aac	5					
Diode	6	N/A (1)	1	1.2V	2.5V	
Hz	7		1 2 3 4	1200Hz 12kHz 120kHz 1MHz (2)	1200Hz 12kHz 120kHz 1MHz (2)	
V (ac+dc)	8	N/A (1)	1 2 3 4 5	120mV 1.2V 12V 120V 750V	400mV 4V 40V 400V 750V	
A (ac+dc)	9	N/A (1)	1 2 3 4	12mA 120mA 1.2A (2) 12A	40mA 120mA 1.2A (2) 12A	
Continuity (Ω/2-wire)	A	N/A (1)	1 2 3 4 5 6 7	120Ω 1.2kΩ 12kΩ 120kΩ 1.2MΩ 12MΩ 120MΩ	400Ω 4kΩ 40kΩ 400kΩ 4MΩ 40MΩ 300MΩ	

(1) Not Applicable (2) For Model-A only

Tabla 10: Resumen de Comandos

El amperímetro dispone de dos *displays* para realizar diferentes medidas, a cada uno se accede por los comandos S1 ó S2. La sintaxis es **Sn<f><r><x>** donde:

- ‘n’ es el número del *display*, puede ser 1 ó 2.
- ‘f’ especifica la función de medida.
- ‘r’ especifica el rango de medida.
- ‘x’ especifica el radio de lectura.

- **Comandos de respuesta (R0)**. Este comando se envía del ordenador al amperímetro para que devuelva el valor actual del *display*. El amperímetro responde con una cadena de caracteres de 10 dígitos. La sintaxis es la siguiente:

  <h1h2><g1g2><v><x><f1><r1><f2><r2>

  Donde cada uno representa:

  - **<h1h2> (tabla 11)**

<h1h1>	Bit	Estado	0	1
<h1>	7	Modo comparación	Off	On
	6	Modo relativo	Off	On
	5	Modo dB	Off	On
	4	Modo dBm	Off	On
<h2>	3	Modo Display	Simple	Doble
	2	Comparar Resultado	x	Hi
	1		x	Pass
	0		x	Lo

Tabla 11: Comandos de respuesta <h_1h_2> al recibir R0

  - **<g1g2> (tabla 12)**

<g1g1>	Bit	Estado	0	1
<g1>	7	Modo calibración	Off	On
	6	2ª función	Off	On
	5	Botón Shift	Off	On
	4	Lectura Hold	Off	On
<g2>	3	1º Autorango	Off	On
	2	2º Autorango	Off	On
	1	Mínimo	Off	On
	0	Máximo	Off	On

Tabla 12: Comandos de respuesta <g_1g_2> al recibir R0

- **<v>** Puede tomar los valores del 0 al 3 y se usa para representar la intensidad del *display* de menos a más intensidad.
- **<x>** Indica el estado del radio de lectura del amperímetro. Pueden tomar los siguientes valores: 'S', 'M' y 'F', cada uno de ellos representa lento (*slow*), medio (*medium*) y rápido (*fast*) respectivamente.
- **<f1> ó <f2>** Indica la función de medida del primer y segundo *display*.
- **<r1> ó <r2>** Indica el rango de medida del *display*. Puede tomar los valores del 1 al 7 según la tabla 13.

Function	<f_1>=	<f_2>=	<r_1> or <r_2>=	Range		
				Sow Rate	Med. Rate	Fast Rate
Vdc	0		1 2 3 4 5	120mV 1.2V 12V 120V 1000V	400mV 4V 40V 400V 1000V	
Vac	1		1 2 3 4 5	120mV 1.2V 12V 120V 750V	400mV 4V 40V 400V 750V	
Ω/2-wire	2	N/A (1)	1 2 3 4 5 6 7	120Ω 1.2kΩ 12kΩ 120kΩ 1.2MΩ 12MΩ 120MΩ	400Ω 4kΩ 40kΩ 400kΩ 4MΩ 40MΩ 300MΩ	
Ω/4-wire	3					
Adc	4		1 2 3 4	12mA 120mA 1.2A (2) 12A	40mA 120mA 1.2A (2) 12A	
Aac	5					
Diode	6	N/A (1)	1	1.2V	2.5V	
Hz	7		1 2 3 4	1200Hz 12kHz 120kHz 1MHz (2)	1200Hz 12kHz 120kHz 1MHz (2)	
V (ac+dc)	8	N/A (1)	1 2 3 4 5	120mV 1.2V 12V 120V 750V	400mV 4V 40V 400V 750V	
A (ac+dc)	9	N/A (1)	1 2 3 4	12mA 120mA 1.2A (2) 12A	40mA 120mA 1.2A (2) 12A	
Continuity (Ω/2-wire)	A	N/A (1)	1 2 3 4 5 6 7	120Ω 1.2kΩ 12kΩ 120kΩ 1.2MΩ 12MΩ 120MΩ	400Ω 4kΩ 40kΩ 400kΩ 4MΩ 40MΩ 300MΩ	

(1) Not Applicable (2) For Model-A only

Tabla 13: Rango de medida del display [8]

4.3.2. Desarrollo de la aplicación

Nada más iniciar el programa, se comprueba que hay comunicación, luego se envían unos comandos para indicarle al amperímetro que va a medir voltaje en mV, se espera 5

segundos y se envía otro comando para marcarle el cero, así se evita errores de *offset* en la medida. Todos los comandos que se envían al amperímetro tienen una respuesta según la tabla 8 acorde al tipo de dato recibido. Según esta tabla realizamos una subrutina para el control de errores. Si todo ha ido bien, el programa sigue una función secuencia donde están implementados todos los comandos del panel frontal que hay en el amperímetro.

4.4. Fuentes de corrientes y amperímetros digitales

Se crea una estructura *"do while"* donde se realizan una serie de acciones dentro de la estructura y sale de la misma cuando cumple una serie de condiciones. Las acciones que se ejecutan dentro de esa estructura son:

- Configuración de la fuente de corriente. Se envía una serie de datos a la fuente de corriente y la fuente devuelve unos datos que son procesados y mostrados por el panel frontal.
- Configuración del amperímetro digital. Se envía un conjunto de datos de configuración y el amperímetro nos devuelve los datos correspondientes a la medida que necesitamos. En el programa de control del amperímetro se han implementado todos los comandos necesarios para el control de todas las funciones que se pueden realizar en modo local.
- Control de comunicación. Nada más iniciar la aplicación tanto del amperímetro como de la fuente de corriente, se comprueba si hay comunicación entre el dispositivo y el ordenador. Una forma de comprobarlo es enviarle a cada dispositivo un comando pidiéndole que envíe el número de versión. El ordenador cuando recibe el número de versión lo compara con una constante (versión real del aparato), si no cambia es que la comunicación es correcta pero si no recibe nada salta una alarma de comunicación errónea.
- Control de errores. Si hay algún error interno de la fuente o si se pierde superconductividad en la bobina, la fuente de corriente lo detecta y envía una alarma de cómo solucionar el problema.

Cada vez que el programa realiza la estructura *"do while"* hay un indicador de color amarillo que muestra el refresco del programa.

Una vez terminado el programa de control de cada uno de los dispositivos, se genera un ejecutable junto con su instalador para cada dispositivo, de esta manera la ejecución no depende de la disponibilidad de *Labview* de la red.

5. VISUALIZACIÓN REMOTA

Se ha creado una página *web* donde se puede visualizar el panel frontal de los programas de control, como puede verse en la figura 16. Para acceder a la página es necesaria una contraseña que deberá ser solicitada al departamento de ECRH. La URL (U*niform Resource Locator*) donde podremos visualizar todos estos controles es:

- http://cmt1500.ciemat.es/ccmg.htm

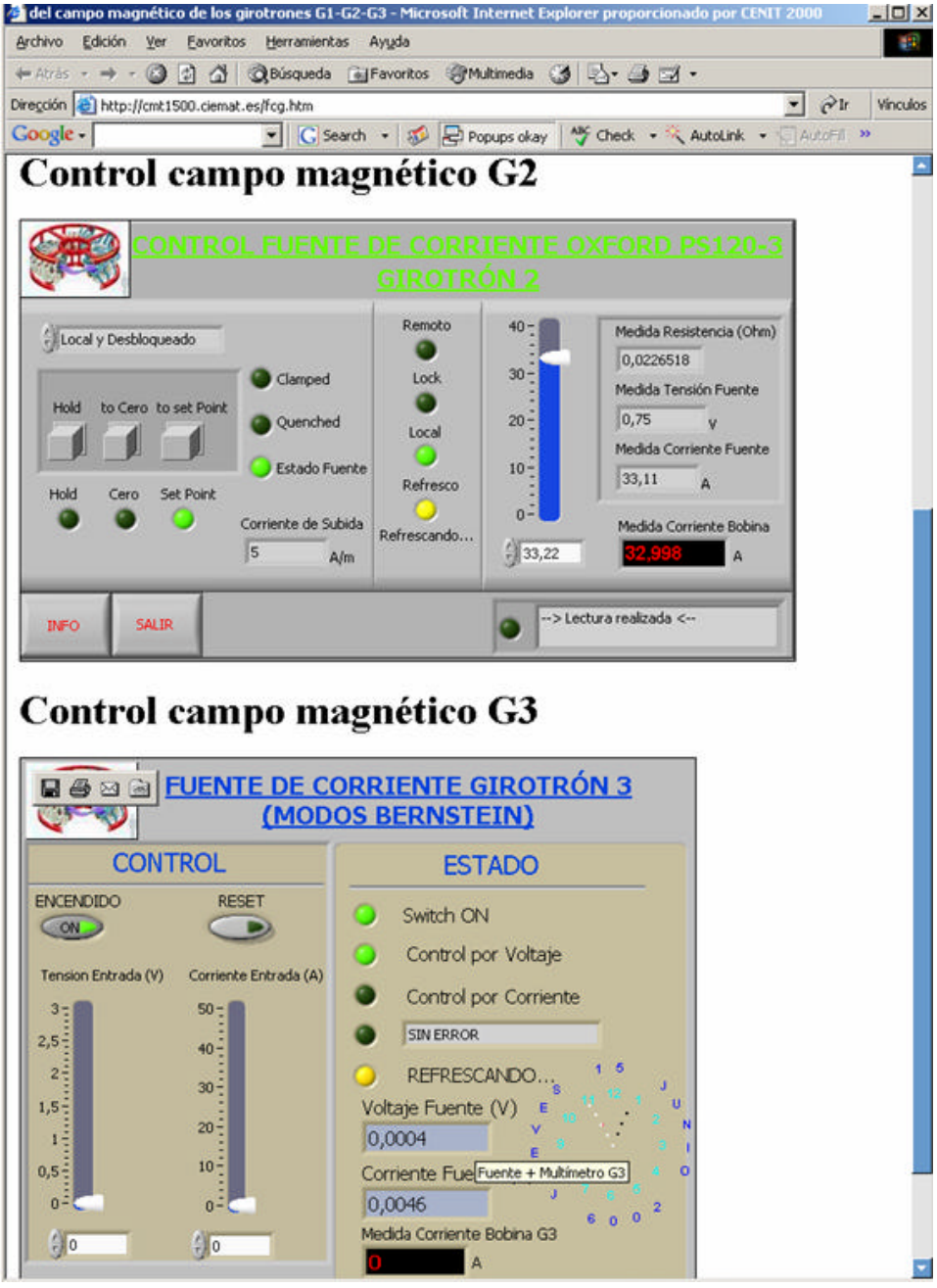


Figura 16: Sistema de visualización vía web.

6. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema de control en *Labview 7.0* para las fuentes de corriente que controlan el campo magnético y los amperímetros digitales de alta precisión que miden la corriente real en la bobina superconductora de cada uno de los girotrones del TJ-II.

El desarrollo de este control va a permitir instalar las fuentes de corriente dentro de la nave del TJ-II lo más cerca posible de los girotrones. De esta forma, se eliminan de la sala de control de ECRH las fuentes de alta tensión, aislando las señales mediante fibra óptica. Además, se libera espacio en los *racks* de la sala de control, necesario a medida que se implementan mejoras en el sistema. También permitirá en un futuro tener una adquisición automatizada de todos los parámetros del sistema de ECRH en el momento del pulso.

Todos los programas se han probado y verificado en la sala de control durante un periodo de 3 meses, depurando y solventando los errores que se han ido identificando.

Se ha creado además una página *web* donde se puede visualizar el panel frontal de los programas de control.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración del Dr.Ing.Günter Müller por su inestimable ayuda a la hora de realizar sugerencias en este trabajo, al Dr. J.M. Fontdecaba por sus revisiones al documento y al Dr. A.Cappa por sus comentarios. También estamos agradecidos al grupo de electrónica del Laboratorio Nacional de Fusión y especialmente a Antonio López Sánchez. Quisiera destacar la magnífica ayuda prestada por Javier Encabo Fernández, al que personalmente le debo el haberme abierto los ojos en los momentos más tediosos y delicados de la programación.

8. REFERENCIAS

[1] V.Erckmann and U.Gasparino. “Electron cyclotron resonance heating and current drive in toroidal fusion plasmas”. Plasma Phys.Control.Fusion (1994) 1869 - 1962.

[2] E.Ascasibar et al. “Overview of TJ-II heliac results” (2001). Fusion Engineering and Design. Vol 56.

[3] V.Flyagin, V.Gaponov, M.Petelin. “The gyrotron”. Microwave theory and techniques (1977). Vol. 25. 514 - 521.

[4] A.Fernández et al. “Design of the upgraded TJ-II quasi-optical transmission line”. Int.J. of Infrared and Millimeter Waves (2001). Vol 22. 649 - 660.

[5] A.Fernández et al. “The design of an electron Bernstein Waves heating system for the TJ-II stellarator”. Fusion Science and Technology (2004.) Vol 46. 335 - 341.

[6] PALACIOS, Enrique; REMIRO, Fernando; LÓPEZ, Lucas J. *Microcontrolador PIC16F84. Desarrollo de proyectos, Editorial: RA-MA, Capítulo 20, pag. 305-312 ISBN: 84-7897-600-0.*

[7] Research Instruments OXFORD, Superconducting magnet power supply PS120-3, File reference: CBG03.DOC, England, September (1995).

[8] F.u.G. Elektronik GmbH, Technical Manual Low Voltage Power Supplies NTS 150M-3, Serial number: 12787-01-01, Germany, September (2003).

[9] BK Precision, Instruction Manual Digit Dual Display Bench Multimeter, P/N 481-408-9-001, Taiwan, March (1998).